

El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocarburante

César Peteiro¹, Óscar Jesús Prado² y Manuel García-Tasende³

1. Centro Oceanográfico de Santander, Instituto Español de Oceanografía (IEO)

2. Aeris Tecnologías Ambientales S.L., Barcelona

3. Subdirección Xeral de Acuicultura, Consellería do Medio Rural e do Mar, Xunta de Galicia

Introducción a los carburantes

El consumo de combustibles de origen fósil conlleva una serie de impactos estratégicos (fuerte dependencia en los países no productores), económicos (crisis relacionadas con el petróleo), y ambientales (emisiones de dióxido de carbono) que han motivado la búsqueda de otras fuentes alternativas para los carburantes derivados del petróleo (gasolina y diésel). Los biocarburantes son aquellos combustibles empleados específicamente en automoción que se producen a partir de materias primas de origen biológico, fundamentalmente biomasa vegetal. Estos biocombustibles constituyen una alternativa renovable frente a la gasolina y diésel. Los biocombustibles líquidos (bioetanol y biodiésel) y el biogás son los biocarburantes más extendidos para el transporte, y su uso tiene importantes beneficios ambientales, estratégicos y económicos. Desde un punto de vista ambiental, el uso de biocombustibles tiene como ventaja frente a los carburantes de origen fósil que el balance entre la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) producido durante su combustión y el consumido por los procesos fotosintéticos de los vegetales es neutro, lo que ayuda a mitigar la producción de gases de efecto invernadero, responsables del cambio climático. El uso de biocarburantes no emite sustancias contaminantes al medio ambiente tales como plomo, azufre y otros compuestos tóxicos presentes en los combustibles derivados del petróleo. Por otra parte, la biomasa como fuente renovable y autóctona de biocombustibles tiene la ventaja de reducir nuestra fuerte dependencia por los carburantes fósiles.

El bioetanol es el biocarburante más utilizado y desarrollado en la actualidad como un sustituto parcial o total de la gasolina. Se usa como biocarburante principalmente combinado al 5-15% con gasolina en vehículos modernos y en concentraciones de hasta el 100% en vehículos con motores modificados (flexifuel). Además, la adición de derivados del bioetanol (ETBE) sirve para oxigenar la gasolina, lo que evita el uso de otros aditivos nocivos procedentes del petróleo. El bioetanol se obtiene mediante fermentación alcohólica de azúcares, de origen vegetal, realizada por microorganismos en condiciones de anaerobiosis (ausencia de oxígeno). Para su producción se emplean gran variedad de productos agrícolas, pero las principales materias primas proceden del cultivo de caña de

azúcar y maíz, y en menor medida, de trigo y cebada. Los principales problemas asociados con el bioetanol convencional son la falta de disponibilidad y altos costes de materias de origen agrícola. Además, en los últimos años, se ha criticado el uso extensivo de cosechas agrícolas para la obtención de biocombustibles, al reducir la disponibilidad tanto de alimentos como de agua dulce (e.g. APPA, 2007; Hackenberg, 2008; Serrano-Ruiz y Luque, 2011).

Obtención de biocarburantes a partir de algas

Como fuente alternativa a los carburantes derivados del petróleo, se puede producir, por ejemplo, bioetanol a partir de algas o diversos residuos vegetales mediante el uso de nuevas tecnologías (conocidos como biocombustibles de segunda generación). En su generación se pretende integrar su producción a la de otros productos con valor comercial dentro de lo que sería una bio-refinería. De esta forma no solo se mejoran los beneficios sino que también se reducen los residuos o desechos que se generan (e.g. APPA, 2007; Hackenberg, 2008; Serrano-Ruiz y Luque, 2011). Con el fin de fomentar el uso de biocarburantes, la Comisión Europea y sus Estados Miembros han puesto marcha medidas para que en 2020 supongan al menos un 10% del consumo total de los combustibles para automoción. Recientemente, el Parlamento Europeo ha respaldado una propuesta para promover la producción de biocarburantes de segunda generación frente a los convencionales o de primera generación.

Las algas son organismos fotosintéticos que utilizan la energía de la luz para transformar el dióxido de carbono, el agua y nutrientes inorgánicos en oxígeno y biomasa vegetal. Se pueden diferenciar entre algas unicelulares microscópicas (microalgas) que viven libres en los sistemas acuáticos y algas multicelulares de mayor tamaño (macroalgas) que crecen adheridas a sustratos estables principalmente en fondos marinos. Las macroalgas se clasifican principalmente en algas pardas (Phaeophyceae), algas rojas (Rhodophyceae) y algas verdes (Chlorophyceae) dependiendo del color de sus pigmentos y estas presentan una gran diversidad de morfologías y tamaños que incluyen desde formas macroscópicas filamentosas hasta arborescentes. Aunque las microalgas han sido objeto de estudio durante los últimos años para la producción de biodiésel (e.g. Chisti, 2007; Gouveia y Oliveira, 2009), las macroalgas marinas han despertado recientemente un gran interés para la obtención de diferentes biocarburantes por su composición química y capacidad de producir grandes biomásas (e.g. Gosch et al., 2012; Hughes et al., 2012; Langlois et al., 2012; Kraan, 2013; Wei et al., 2013). Las macroalgas como fuente de biocombustibles presentan importantes ventajas respecto a otras materias primas: tienen un mayor crecimiento que las plantas agrícolas empleadas hasta ahora, además de que su empleo no compromete la producción de alimentos básicos u otros productos derivados de las cosechas, y su cultivo a gran escala es factible, rentable y no ocupa tierras ni requiere aporte de agua dulce.

La biomasa de las macroalgas marinas contiene polisacáridos (compuestos ricos en azúcares), lípidos y proteínas, entre otros componentes orgánicos, que se pueden utilizar para producir diferentes biocarburantes: (1) bioetanol, a partir de la fermentación alcohólica (en ausencia de oxígeno o en anaerobiosis) de los polisacáridos (e.g. Kraan, 2013; Wei et al., 2013), (2) biodiésel derivado de los lípidos mediante un proceso químico conocido como transesterificación (e.g. Aresta et al., 2005; Gosch et al., 2012), y (3) biogás producido por una digestión o descomposición de los compuestos orgánicos de la biomasa (e.g. Hughes et al., 2012; Langlois et al., 2012) (**Figura 1**). Aunque la producción de bioetanol es la que tiene actualmente un mayor interés por el alto contenido de polisacáridos en las macroalgas marinas y particularmente en las laminarias, algas pardas que se caracterizan por presentar un mayor tamaño, con un talo o fronde de varios metros de longitud. Además, la biomasa residual de la generación del bioetanol puede ser aprovechada para producir biogás u otros productos de valor comercial como fertilizantes, forraje para alimentación animal y compuestos de aplicación industrial, entre otros (e.g. Kraan, 2013; Wei et al., 2013).

En los últimos años son numerosas las investigaciones que se han realizado para el desarrollo de la producción de bioetanol mediante la fermentación de los polisacáridos de las macroalgas, especialmente a partir de las algas laminarias (Adams et al., 2009; Wargacki et al., 2012; Kraan, 2013). En estas grandes algas pardas los polisacáridos suponen aproximadamente el 60% de su peso seco, aunque se requiere previamente su transformación en azúcares sencillos para su fermentación en bioetanol. Este proceso es conocido como sacarificación y consiste en la hidrólisis o rotura de los polisacáridos mediante tratamientos químicos. En la hidrólisis de los polisacáridos se aplican sobre todo tratamientos enzimáticos (Adams et al., 2009; Choi et al., 2009; Wei et al., 2013), mientras que en la fermentación de los azúcares resultantes se utilizan diferentes microorganismos como levaduras y bacterias (Kim et al., 2011; Wargacki et al., 2012) (**Figura 2**). Recientemente se han llevado a cabo investigaciones con el objeto de disponer de microorganismos más eficientes para la conversión directa de los polisacáridos macroalgales en bioetanol (Kim et al., 2011; Wargacki et al., 2012). Así, científicos del Bio Architecture Lab en Estados Unidos han conseguido modificar genéticamente la bacteria *Escherichia coli* para la hidrólisis y fermentación simultánea de polisacáridos de laminarias (Wargacki et al., 2012). De esta manera se ha logrado un rendimiento de 0,3 gramos de etanol por cada gramo (peso seco) del alga, que representa aproximadamente el 80% de los polisacáridos de las laminarias. En la actualidad, estos avances tecnológicos para producir bioetanol y otros productos a partir de las algas laminarias se está ensayando a escala comercial (e.g. ver <http://www.ba-lab.com/>).

Cultivo de macroalgas como fuente de biocarburantes

Para el éxito de la producción de bioetanol a partir de algas laminarias es necesario un suministro sostenible de biomasa que permita su aplicación industrial como fuente de biocarburantes. Aunque los recursos naturales de las laminarias son limitados, particularmente en la costa atlántica española, su cultivo a gran escala es viable mediante técnicas sencillas y de bajo coste. La acuicultura marina o maricultura de macroalgas, definida como una agronomía marina, tiene una gran relevancia en Japón, China y Corea del Sur donde, por ejemplo, especies de laminarias conocidas con el nombre comercial de “kombu” se cultivan comercialmente. Actualmente, la agronomía marina de laminarias en Asia produce unas 8 millones de toneladas al año, mientras que en Europa y América se está empezado a cultivar de manera experimental o en pequeña escala.

En España, el Instituto Español de Oceanografía dispone de la tecnología y conocimientos necesarios para la maricultura de laminarias a gran escala. Por ejemplo, las técnicas para el cultivo en mar de la laminaria autóctona *Saccharina lattissima*, que se conoce con el nombre como “kombu de azúcar”, ha sido ya desarrollado a escala comercial en nuestras costas atlánticas, especialmente en las rías gallegas (Peteiro y Freire, 2009; Peteiro y Freire, 2013; Peteiro et al., 2014). En su cultivo se reproducen las fases del ciclo de vida que caracteriza a las algas laminarias donde hay una alternancia entre una generación formada por filamentos microscópicos (llamado gametófito por producir gametos) y una generación formada por una fronde macroscópica (conocida como esporófito porque a su vez produce esporas). El cultivo de las laminarias se divide en dos fases muy diferenciadas, una de cultivo en laboratorio y otra de cultivo en mar. La primera fase de laboratorio consiste en el cultivo en cámaras de simulación ambiental de gametófitos microscópicos que actúan como un “banco de semilla”) (**Figura 3**). Estos gametófitos son sembrados sobre hilos y cultivados en tanques de embriogénesis con condiciones ambientales específicas producir plántulas (jóvenes esporófitos). Estos hilos con plántulas recibe el nombre de “semilla” en la maricultura de laminarias (**Figura 4**). En la segunda fase la “semilla” es implantada sobre cabos o cuerdas que se colocan dentro de un parque de cultivo flotante (**Figura 5**), creciendo en el mar hasta que sus frondes presentan una talla comercial de más de metro y medio (**Figura 6**). La producción de biomasa en la maricultura del “kombu de azúcar” en Galicia alcanza unos valores de hasta 16 kg peso fresco por metro lineal de cabo de cultivo, aproximadamente unas 40 toneladas peso fresco por hectárea de cultivo, después de unos 5 meses de cultivo en mar (**Figura 7**) (Peteiro y Freire, 2013).

El cultivo de laminarias tendría importantes beneficios ambientales ya que las macroalgas para su crecimiento utilizan dióxido de carbono, nitrógeno y fósforo mediante la fotosíntesis, de modo que contribuyen a reducir el carbono atmosférico y los residuos inorgánicos del medio marino. Particularmente, el uso de los cultivos de macroalgas es de gran interés para el desarrollo de una acuicultura sostenible al absorber parte de residuos orgánicos e inorgánicos que produce el cultivo de peces y moluscos. Esta asociación de organismos con diferentes

niveles tróficos o nutricionales constituye un sistema de policultivo integrado, conocido como acuicultura multitrófica integrada (Vázquez Ferreiro et al., 2011; Buschmann et al., 2013; Chopin, 2013). Una propuesta de esta acuicultura ambientalmente sostenible sería el cultivo de laminarias en las rías gallegas conjuntamente con las bateas de mejillón y jaulas de peces que existen en la actualidad. Las laminarias que habitan en nuestras costas atlánticas son actualmente utilizadas principalmente para alimentación humana y en otras aplicaciones como fertilizante y forraje para la acuicultura de herbívoros como el erizo de mar y la oreja de mar. Sus múltiples usos y potenciales aplicaciones se espera que se integren en bio-refinerías desarrolladas principalmente a partir de su cultivo en el mar. El concepto de bio-refinería de laminarias es análogo a la de una refinería de petróleo que produce combustibles y múltiples productos a partir del petróleo. Así, por ejemplo, los residuos que se producen durante el procesamiento de la laminarias para consumo humano (hasta un 40% de su biomasa) se emplearían para producir biocarburantes o como fertilizante, forraje u otros usos (Peteiro y Freire, 2013). De la misma forma pueden ser utilizados para otras aplicaciones los subproductos que se obtienen en el proceso de producción de biocarburantes con estas macroalgas.

Conclusión

Algunas grandes algas marinas como las laminarias tienen un alto contenido de compuestos ricos en azúcares (polisacáridos). Estos polisacáridos pueden utilizarse para la producción de bioetanol mediante un proceso de fermentación con microorganismos que ha sido mejorado recientemente para su aplicación industrial. En este contexto, la acuicultura marina de laminarias en las costas atlánticas españolas puede constituir en un futuro próximo una fuente limpia y renovable de biomasa para la producción de etanol como biocarburante. Además, el desarrollo de bio-refinerías a partir de la maricultura de laminarias en el que se integran la obtención de biocarburantes a la de otros productos de interés comercial (e.g. alimentación humana y animal, fertilizantes, productos químicos, etc.) tendría importantes beneficios económicos y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams J.M., Gallagher J.A., Donnison I.S. 2009. Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments. *Journal of Applied Phycology*, 21: 569–574.
- APPA. 2007. *El desarrollo de la obligación de biocarburantes en España: Beneficios, factores críticos y desafíos para la consolidación del mercado nacional*. Informe de la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA), Madrid.
- Buschmann A.H., Stead R.A., Hernández-González M.C., Pereda S.V. 2013. Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86: 251–264.

- Chisti Y. 2007. Biodiésel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25: 294–306.
- Choi D., Sim H.S., Piao Y.L., Ying W., Cho H. 2009. Sugar production from raw seaweed using the enzyme method. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15: 12–15.
- Chopin T. 2013. Integrated multi-trophic aquaculture ancient: adaptable concept focuses on ecological integration. *Global Aquaculture Advocate*, March/April: 18–19.
- Gosch B.J., Magnusson M., Paul N.A., de Nys R. 2012. Total lipid and fatty acid composition of seaweeds for the selection of species for oil-based biofuel and bioproducts. *Global Change Biology Bioenergy*, 4(6): 919–930.
- Gouveia L., Oliveira A.C. 2009. Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(2): 269–274.
- Hackenberg N. 2008. Biocombustibles de segunda generación. *Revista Virtual REDESMA*, 4: 49–61.
- Hughes A.D., Kelly M.S., Black K.D., Stanley M.S. 2012. Biogas from macroalgae: is it time to revisit the idea? *Biotechnology for Biofuels*, 5: 1–86.
- Kim N.-J., Li H., Jung K., Chang H.N., Lee P.C. 2011. Ethanol production from marine algal hydrolysates using *Escherichia coli* KO11. *Bioresource Technology*, 102(16): 7466–7469.
- Kraan S. 2013. Mass-cultivation of carbohydrate rich macroalgae, a possible solution for sustainable biofuel production. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1): 27–46.
- Langlois J., Sassi J.-F., Jard G., Steyer J.-P., Delgenes J.-P., Hélias A. 2012. Life cycle assessment of biomethane from offshore-cultivated seaweed. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(4): 387–404.
- Peteiro C., Freire Ó. 2009. Effect of outplanting time on the commercial cultivation of the kelp *Laminaria saccharina* at the southern limit in the Atlantic coast, N.W. Spain. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(1): 54–60.
- Peteiro C., Freire Ó. 2013. Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast of Spain. *Journal of Applied Phycology*, 25(1): 205–213.
- Peteiro C., Freire Ó. 2013. Epiphytism on blades of the edible kelps *Undaria pinnatifida* and *Saccharina latissima* farmed under different abiotic conditions. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(5): 706–715.
- Peteiro C., Sánchez N., Dueñas-Liaño C., Martínez B. 2014. Open-sea cultivation by transplanting young fronds of the kelp *Saccharina latissima*. *Journal of Applied Phycology*, 26(1): 519–528.
- Serrano-Ruiz J.C., Luque R. 2011. Biocombustibles líquidos: procesos y tecnologías. *Anales de Química*, 107(4): 383–389.
- Vázquez Ferreiro U., Incera Filgueira M., Fernández Otero R., Moroto Leal J. 2011. *Macroalgas en la acuicultura multitrofica integrada peninsular*. Centro Tecnológico del Mar, Fundación CETMAR, Vigo.
- Wargacki A.J., Leonard E., Win M.N., Regitsky D.D., Santos C.N.S., Kim P.B., Cooper S.R., Raisner R.M., Herman A., Sivitz A.B., Lakshmanaswamy A., Kashiya Y., Baker D., Yoshikuni Y. 2012. An engineered microbial platform for direct biofuel production from brown macroalgae. *Science*, 335(6066): 308–313.
- Wei N., Quarterman J., Jin Y.S. 2013. Marine macroalgae: an untapped resource for producing fuels and chemicals. *Trends in Biotechnology*, 31(2): 70–77.

Figura 1. Esquema de la producción de biomasa en las algas laminarias y los potenciales usos de sus compuestos orgánicos para la obtención de biocarburantes y otros productos de valor comercial. Ilustración: César Peteiro

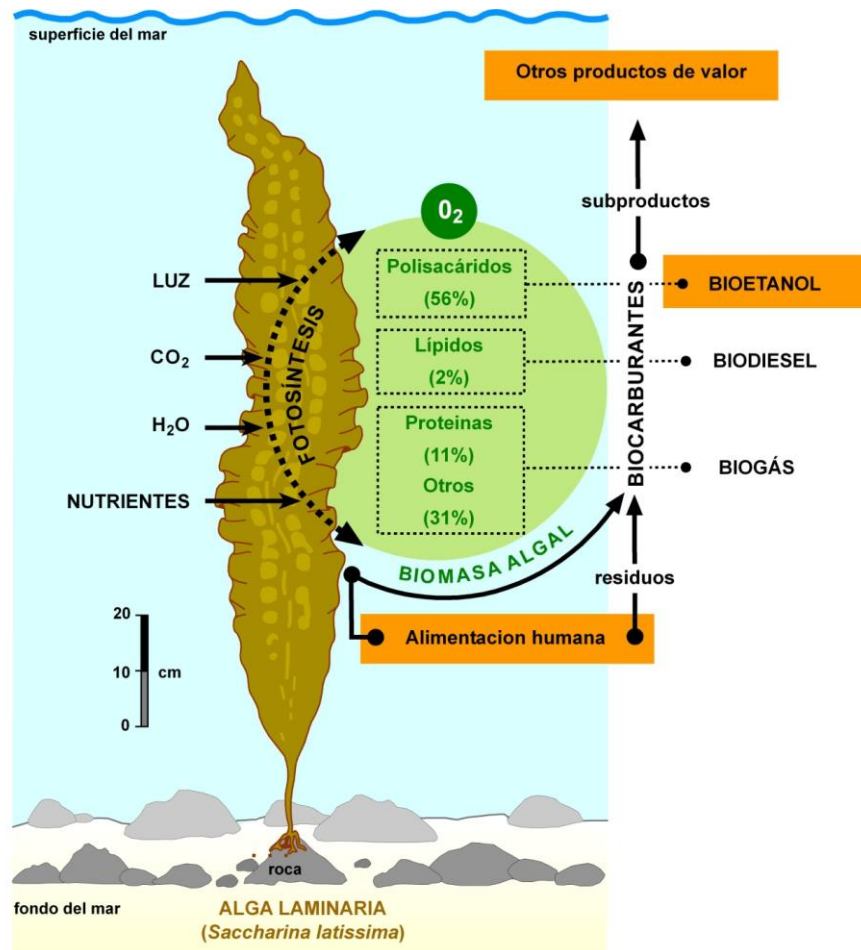


Figura 2. Principales pasos para la conversión de los polisacáridos de las algas laminarias en bioetanol. Ilustración: César Peteiro

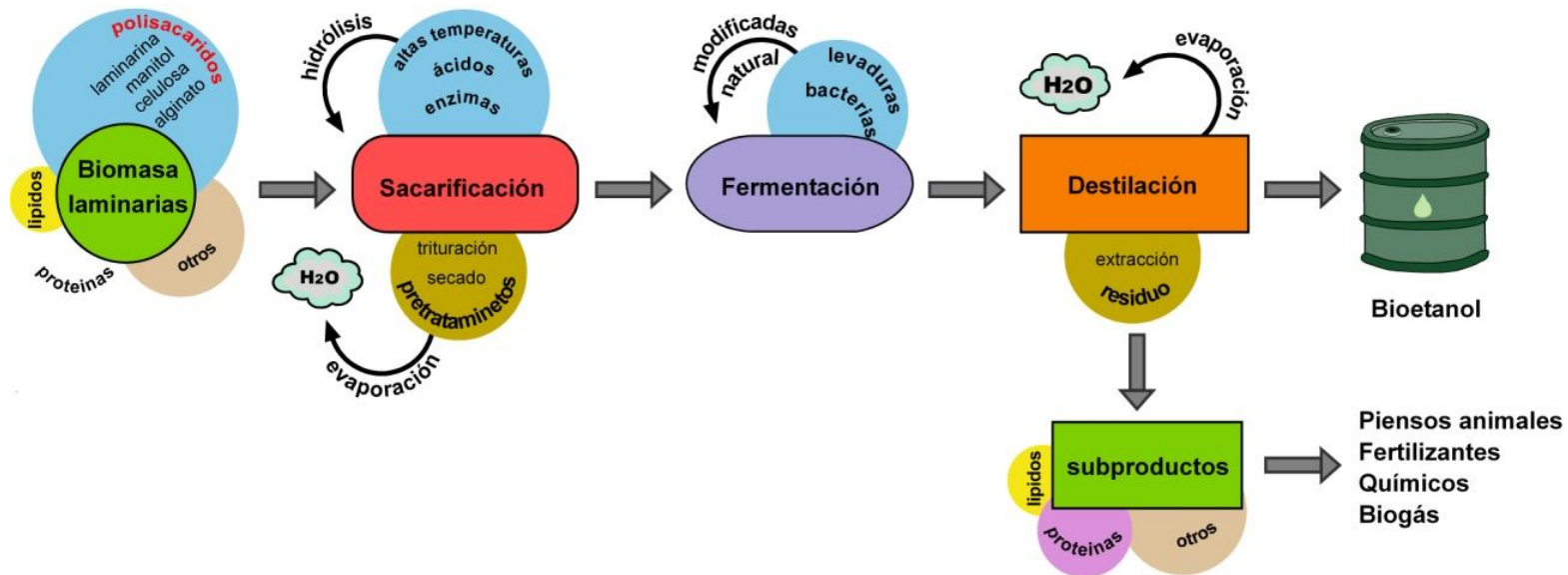


Figura 3. Cultivo de gametófitos de algas laminarias (fase microscópica) que se mantienen en botellones dentro de cámaras de simulación ambiental. Esta fase microscópica actúan como un “banco de semilla” con el que producir plántulas de estas macroalgas (Foto: César Peteiro)



Figura 4. Plántulas de laminarias sobre hilo de unos 4 mm de longitud que es producida a partir del cultivo de gametófitos (“banco de semilla”) en condiciones ambientales controladas (Foto: César Peteiro)



Figura 5. Cultivo de algas laminarias en las rías gallegas conjuntamente con bateas de mejillón y jaulas de peces. Las plántulas son fijadas sobre cuerdas que se disponen en parques de cultivo flotantes (Foto: Óscar Freire)



Figura 6. Desarrollo de la laminaria “kombu de azúcar” a lo largo de unos 4 meses de cultivo en mar (ejemplares secados en cartulinas) (Fotos: César Peteiro)

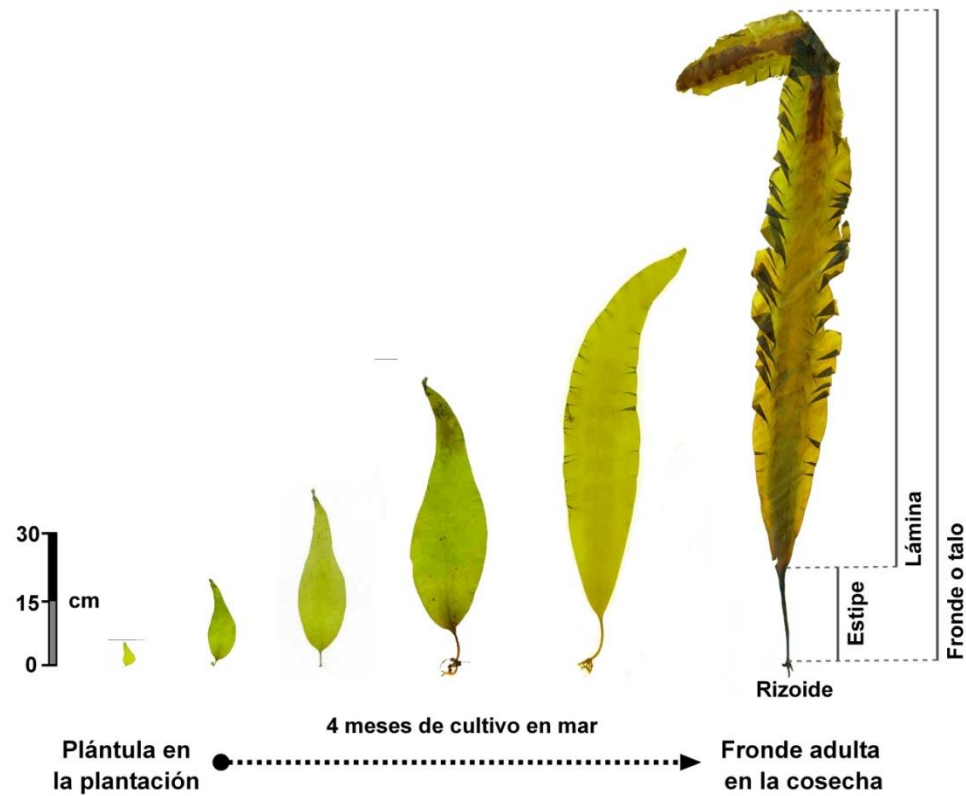


Figura 7. Cabos de cultivo con frondes de laminaria “kombu de azúcar” después de varios meses de crecimiento en el mar (Foto: Óscar Freire)

